

УДК 621.548

**В. Корендій**

*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ОЦІНЮВАННЯ ІНЕРЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВІТРОКОЛЕСА**

**Резюме.** Подано математичний опис, побудовано та проаналізовано графічні часові залежності інерційних (відцентрових, дотичних, коріолісових) навантажень, які діють на лопаті вітроколеса при їх нерівномірному обертанні навколо трьох осей: башти (при зміні напрямку вітру), вітроколеса (внаслідок взаємодії з повітряним потоком) та власних поздовжніх осей (внаслідок зміни швидкості вітру або навантаження на валу вітроколеса при використанні в якості регулятора потужності вітроустановки механізму повороту лопатей).

**Ключові слова:** інерційні навантаження, лопаті вітроколеса, нерівномірне обертання, повітряний потік, механізм повороту лопатей.

**V. Korendiy**

## **EVALUATION OF INERTIAL LOADS OF THE WIND-WHEEL**

**The summary.** Two basic modes of wind turbine functioning (inconstant and permanent) are considered. The first one is limited in time (starting of the wind-wheel, connection with the electrical supply network, normal or emergency stop). In the permanent mode the wind turbine can work perfectly during long time. The inconstant modes are rather dangerous from the viewpoint of dynamics. The starting mode includes: the blade turning from the feathering to optimal position in order to support maximal power takeoff from the wind flow; the change of nacelle position after the wind direction in order to support the perpendicularity of the wind direction to the plane of the wind-wheel rotation; the change of the wind-wheel angular velocity to its nominal value. The situation, when the extreme gust of wind coincides with the change of its velocity, may arise during the functioning of the wind turbine. Also the cyclic character of inertial loading should be taken into consideration when designing the wind turbine. The resonance (the effect of sudden increase of the amplitude of forced oscillations) may arise when the frequency of inertial loading is coming near the frequency of the blade free vibrations. That's why the purpose of this article is to build and analyze the graphical time dependences of centrifugal, tangential and the Coriolis forces of inertia and the evaluation of their extreme values in order to substantiate the expediency of taking them into consideration when designing the wind-wheels.

Mathematical description of the inertial (centrifugal, tangential, Coriolis) loadings, which operate on the wind-wheel blades at their irregular compound motion – rotation round three axes: that of the tower (at the change of wind direction), of the wind-wheel (as a result of interference with air flow) and of own longitudinal axes (as a result of change of wind speed or loading on the wind-wheel billow at the use of the blades traversing gear as the regulator of wind plant power) is presented. Kinematic scheme of the wind turbine when using the mechanism of blades turning, which consists of blade, wind-wheel, nacelle, tower and foundation, is built. Time dependences of inertial loadings in the mode of the wind-wheel starting are shown.

The following conclusions were made after analyzing of the obtained results: 1) the greatest influence (about 95% from equivalent inertial loading) on the blades is caused by the inertial loading, which arises at the wind-wheel rotation. Considerably smaller influence (about 5%) is made by the Coriolis force, which arises at simultaneous rotation of the nacelle and the wind-wheel. Less than 1% from equivalent inertial loading is formed by all other centrifugal, tangential and the Coriolis forces; 2) the Coriolis forces make about 10–15% from total loading on the blade of the wind turbine, when aerodynamic forces – about 50–60%, gravitational – 15–25%, centrifugal, tangential forces of inertia and other loadings – 15–25%. That's why the task of

*theoretical modeling of the Coriolis inertial forces and taking them into consideration when building the mathematical models of the blade loadings is rather up to date; 3) oscillations frequencies and amplitudes of inertial loadings abruptly increase when rising the angular velocity of wind-wheel, nacelle or blade. Herewith, these frequencies may coincide with the frequency of the blade free vibrations and the resonant modes may rise during compound motion of the system; 4) most of the inertial loadings rise only under unsettled modes of wind turbine functioning, i. e. at sharp changing of wind flow direction or speed. These modes are usually short-term, but they should be taken into consideration when designing wind-wheels to provide the of maximal operation reliability of the wind turbine.*

**Key words:** *inertial loads, blades of a wind-wheel, irregular rotation, air flow, blades traversing gear.*

**Постановка проблеми.** При функціонуванні будь-якої вітроенергетичної установки виділяють два основних режими: перехідний та стаціонарний. Перехідний режим характеризується тим, що вітроустановка може працювати у ньому обмежений період часу. До перехідних режимів можна віднести запуск вітроколеса, приєднання до мережі, нормальну чи аварійну зупинку тощо. Стаціонарний режим характерний тим, що вітроустановка може працювати у ньому необмежений період часу протягом усього терміну служби. До стаціонарних режимів можна віднести повну зупинку вітроколеса й нормальну роботу вітроенергетичної установки (як при частковому, так і при повному навантаженні). З точки зору динаміки вітроустановки найнебезпечнішими є перехідні режими – запуск та екстрена зупинка вітроколеса. Також під час експлуатації вітроенергетичної установки може виникнути ситуація, коли екстремальний порив повітряного потоку може співпадати зі зміною його напрямку. Такий екстремальний порив називається когерентним. При запуску, екстреній зупинці чи когерентному пориві вітру лопаті вітроколеса піддаються, окрім аеродинамічних та гравітаційних, цілій низці інерційних навантажень (відцентрових, дотичних, коріолісових) за рахунок нерівномірного обертання навколо трьох осей (вітроколеса, гондоли та власних поздовжніх осей). Ці навантаження необхідно враховувати при моделюванні та проектуванні елементів вітроустановки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізу динаміки вітроустановок присвячено багато публікацій [1–5]. Наприклад, у роботі [1] поставлено задачу аналізу динаміки тихохідного вітроколеса та розроблено методику розрахунку його конструктивних елементів з урахуванням аеродинамічних, відцентрових, дотичних, коріолісових та гравітаційних сил. У публікації [2] проведено розрахунок параметрів міцності та жорсткості лопатей вітроколеса за комплексної дії аеродинамічних, інерційних, гравітаційних сил і моментів від цих навантажень при зміні кутового положення лопатей та осі обертання вітроустановки. У роботі [3] на основі аналізу навантажень вітроколеса з використанням принципів класичної механіки (принцип Д'Аламбера, теорема Коріоліса, теорема про зміну кількості руху) розроблено математичну модель динаміки вітроколеса, яка дозволяє визначати сумарні еквівалентні навантаження на лопаті при їх нерівномірному обертанні навколо трьох осей: башти, вітроколеса та власних поздовжніх осей. У публікації [4] подано аналітичні залежності для розрахунку осьових сил, а також навантажень згину та зрізу, які діють на елементарні ділянки лопатей при їх складному русі. У роботі [5] поставлено задачу аналітичного визначення та комп'ютерного моделювання узагальнених сил, що входять до правої частини диференціальних рівнянь Лагранжа руху лопатей при використанні механізму регулювання частоти обертання вітроколеса. Однак згадані вище дослідження обмежуються лише математичним описом інерційних

навантажень та не дають можливості оцінити їх абсолютну величину, циклічний характер, побудувати часові залежності тощо.

**Метою даної роботи** є побудова та аналіз графічних часових залежностей відцентрових, дотичних та коріолісових сил інерції, які діють на лопаті при їх нерівномірному обертанні навколо трьох осей: башти (при зміні напрямку вітру), вітроколеса (внаслідок взаємодії з повітряним потоком) та власних поздовжніх осей (внаслідок зміни швидкості вітру або навантаження на валу вітроколеса при використанні в якості регулятора потужності вітроустановки механізму повороту лопатей), а також оцінювання екстремальних значень вказаних інерційних навантажень із метою обґрунтування доцільності їх урахування при проектуванні вітроколес.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 зображено кінематичну схему вітроколеса при використанні в якості регулятора його потужності механізму повороту лопатей навколо власних поздовжніх осей. Як бачимо із рисунку, на центр мас півлопаті діють відцентрові  $\Phi_{n1}$ ,  $\Phi_{n2}$ ,  $\Phi_{n3}$  та дотичні сили  $\Phi_{\tau1}$ ,  $\Phi_{\tau2}$ ,  $\Phi_{\tau3}$  при його нерівномірному обертанні навколо осей, відповідно, башти, вітроколеса та лопаті. Також унаслідок одночасного обертання навколо осей башти і вітроколеса, башти і лопаті, вітроколеса і лопаті виникають відповідні коріолісові сили інерції –  $\Phi_{cor1}$ ,  $\Phi_{cor2}$ ,  $\Phi_{cor3}$ . Аналітичні залежності для визначення вказаних навантажень мають такий вигляд [1–5]:

$$\Phi_{n1} = m \cdot \omega_1^2 \cdot \sqrt{(r^2 + (b \cos \theta)^2) \cdot \sin^2 \psi + (c + b \sin \theta)^2}; \quad \Phi_{n2} = m \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{r^2 + (b \cos \theta)^2};$$

$$\Phi_{n3} = m \cdot \omega_3^2 \cdot b; \quad \Phi_{\tau1} = m \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{(r^2 + (b \cos \theta)^2) \cdot \sin^2 \psi + (c + b \sin \theta)^2};$$

$$\Phi_{\tau2} = m \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt{r^2 + (b \cos \theta)^2}; \quad \Phi_{\tau3} = m \cdot \varepsilon_3 \cdot b; \quad \Phi_{cor1} = 2 \cdot m \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{r^2 + (b \cos \theta)^2} \cdot \cos \psi;$$

$$\Phi_{cor2} = 2 \cdot m \cdot \omega_1 \cdot \omega_3 \cdot b \cdot \sqrt{\cos^2 \psi + \cos^2 \theta - \cos^2 \psi \cdot \cos^2 \theta}; \quad \Phi_{cor3} = 2 \cdot m \cdot \omega_2 \cdot \omega_3 \cdot b \cdot \sin \theta,$$

де  $m$  – маса пів лопаті;  $\omega_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\varepsilon_3$  – кутові швидкості та пришвидження обертання, відповідно, гондоли навколо осі башти, вітроколеса і лопаті;  $r$  – радіус лопаті, на якому розміщений її центр мас;  $c$  – відстань від осі башти до осі лопаті;  $b$  – відстань від осі лопаті до центру мас півлопаті;  $\psi$ ,  $\varphi$  – кути відхилення центру мас півлопаті, відповідно, від додатного напрямку осі  $Oz$ , яка співпадає з віссю башти, та осі  $Ox$ , яка разом із віссю  $Oy$  утворює горизонтальну площину повороту гондоли;  $\theta$  – кут положення площини лопаті відносно площини обертання вітроколеса.

Геометричні параметри вітроколеса обираємо із умови забезпечення номінальної потужності вітроустановки 10 кВт при швидкості повітряного потоку 9 м/с:  $r = 4.5$  м,  $b = 0.3$  м,  $c = 1$  м,  $m = 20$  кг. Припускаючи, що час запуску вітроколеса до досягнення ним номінальної частоти обертання 150 об/хв ( $\omega_2 = 15.7$  рад/с) дорівнює 10 с, задаємо закони руху гондоли, вітроколеса і лопатей, які відповідають режиму запуску:  $\varphi(t) = 0.032 \cdot t^2$  (рад),  $\psi(t) = 0.8 \cdot t^2$  (рад),  $\theta(t) = 0.01 \cdot t^2$  (рад). Нагадаємо, що режим запуску вітроустановки включає у себе: поворот лопатей з флюгерного в оптимальне положення з метою максимального відбору потужності з потоку повітря; зміну положення гондоли за напрямком вітру для забезпечення перпендикулярності напрямку повітряного потоку до площини обертання вітроколеса; зміну частоти обертання

вітроколеса до номінального значення. У таблиці наведено закони руху й часові залежності кутових швидкостей та пришвидшень обертання гондоли вітроколеса і лопатей у режимі запуску вітроустановки, а також екстремальні параметри руху лопатей при когерентних поривах вітру.

Таблиця. Параметри руху лопатей вітроколеса

| Умови роботи | Нормальні (запуск вітроколеса) |                       |  | Екстремальні (когерентний порив вітру) |  |
|--------------|--------------------------------|-----------------------|--|--|--|
|              | Закон руху (рад)               | Кутова швидк. (рад/с) | Кутове пришвидш. (рад/с <sup>2</sup> ) | Кутова швидк. (рад/с)                  | Кутове пришвидш. (рад/с <sup>2</sup> ) |
| Гондола      | $0.032 \cdot t^2$              | $0.064 \cdot t$       | 0.064                                  | 2.2                                    | 0.2                                    |
| Вітроколесо  | $0.8 \cdot t^2$                | $1.6 \cdot t$         | 1.6                                    | 21                                     | 2                                      |
| Лопать       | $0.01 \cdot t^2$               | $0.02 \cdot t$        | 0.02                                   | 0.3                                    | 0.25                                   |

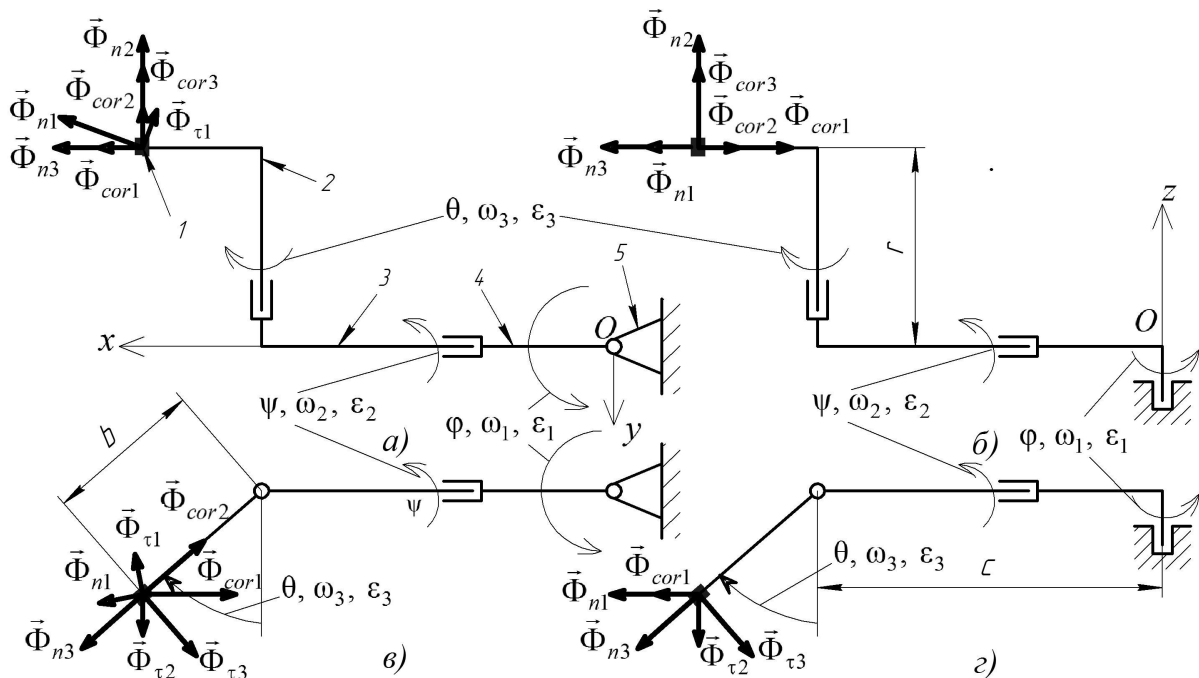


Рисунок 1. Кінематична схема вітроколеса при використанні механізму повороту лопатей: 1 – центр ваги півлопаті; 2 – вісь лопаті; 3 – вісь вітроколеса; 4 – вісь гондоли; 5 – башта (фундамент)

Figure 1. Kinematic scheme of wind-wheel when using the mechanism of blades turning: 1 – the center of gravity of the blade half; 2 – the blade axis; 3 – the wind-wheel axis; 4 – the nacelle axis; 5 – tower (foundation)

Як бачимо з таблиці, параметри руху лопатей при екстремальних умовах роботи вітроустановки (різких поривах, раптових змінах напрямку вітру) значно перевищують параметри руху при запуску вітроколеса. Тому оцінимо екстремальні значення інерційних навантажень лопатей та обґрунтуємо доцільність їх урахування при проектуванні вітроколіс. Використовуючи подані вище аналітичні залежності та дані

таблиці, отримаємо:  $\Phi_{n1} \approx 455$  Н;  $\Phi_{n2} \approx 39780$  Н;  $\Phi_{n3} \approx 1$  Н;  $\Phi_{\tau1} \approx 19$  Н;  $\Phi_{\tau2} \approx 180$  Н;  $\Phi_{\tau3} \approx 2$  Н;  $\Phi_{cor1} \approx 8334$  Н;  $\Phi_{cor2} \approx 8$  Н;  $\Phi_{cor3} \approx 76$  Н. Для обраних геометричних параметрів вітроколеса і номінальної потужності вітроустановки максимальні значення сили лобового тиску повітряного потоку, аеродинамічної підйомної сили та гравітаційного навантаження на лопаті становлять, відповідно, близько 75710 Н, 410100 Н, 200 Н. Отже, на перший погляд зрозуміло, чому при проектуванні конструктивних елементів вітроколес не розраховують інерційні навантаження на лопаті, обмежуючись лише коефіцієнтом запасу міцності 40–50%. Такий коефіцієнт запасу обґрунтовується тим, що окрім інерційних та гравітаційних сил, які в сукупності складають 35–40% від сумарного навантаження на елементи вітроустановки. На них також можуть впливати експлуатаційні фактори (сейсмічна активність земної кори, Коріолісові сили інерції внаслідок обертання Землі, природно-кліматичні умови, силові впливи під час транспортування, встановлення, монтажу, обслуговування чи ремонту).

Однак при проектуванні вітроустановки слід враховувати циклічний характер інерційних навантажень, які впливатимуть на втомну міцність та коливні процеси її елементів. Втома матеріалу, як відомо, характеризується поступовим його руйнуванням у результаті накопичення пошкоджень, зародження та розвитку тріщин під дією змінних напружень. Також відомо, що навіть незначні за абсолютним значенням сили здатні викликати руйнівні процеси в деталях машини чи механізму за рахунок виникнення явища резонансу. Вказане вкрай небезпечне явище виникає при наближенні частоти збурюючої (в нашому випадку інерційної) сили до частоти власних коливань системи та призводить до різкого збільшення амплітуди вимушених коливань. Враховуючи циклічний характер інерційних навантажень лопатей при їх складному русі навколо трьох осей, задача теоретичного дослідження та врахування інерційних сил при розрахунку елементів вітроколес є досить актуальною. Тому на основі поданих вище аналітичних формул і даних таблиці побудуємо та проаналізуємо графічні часові залежності зміни інерційних сил у режимі запуску вітроколеса (рис. 2).

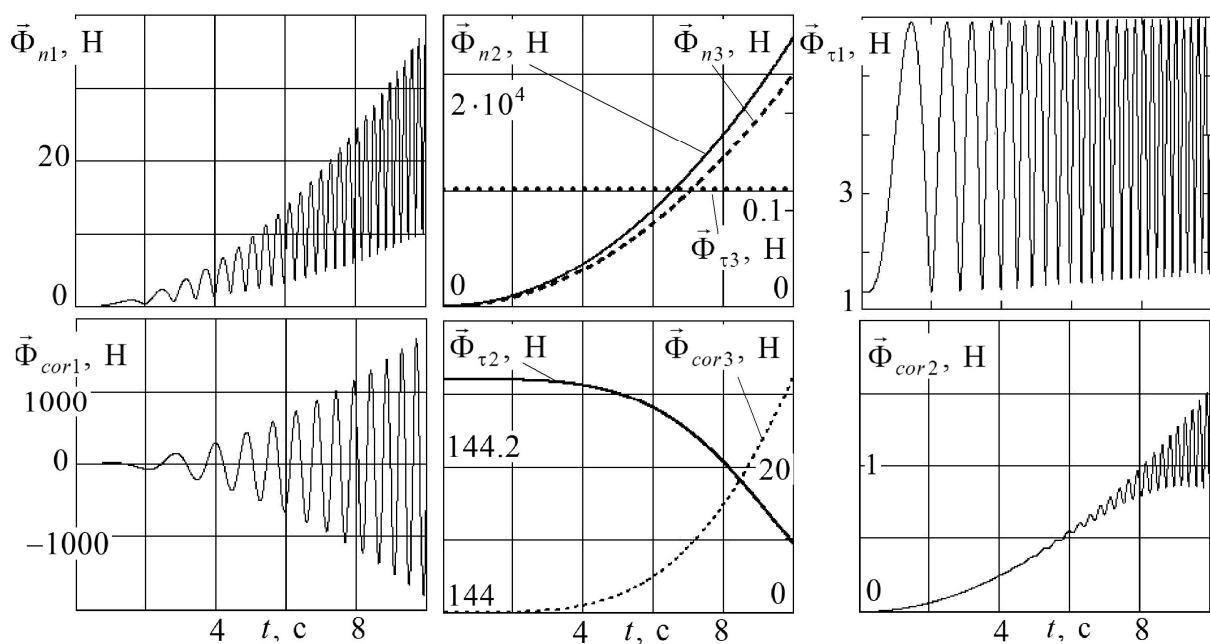


Рисунок 2. Часові залежності інерційних навантажень у режимі запуску вітроколеса

Figure 2. Time dependencies of inertial loadings in the mode of wind-wheel starting

Як бачимо із отриманих графічних залежностей, суттєво виражений циклічний характер мають відцентрові й дотичні сили інерції, які діють на лопать при нерівномірному обертанні гондоли, тобто при різких змінах напрямку повітряного потоку, а також коріолісові інерційні сили, що виникають внаслідок одночасного обертання гондоли і вітроколеса та гондоли й лопаті. Зі збільшенням кутової швидкості обертання кожного з елементів вітроустановки різко зростає амплітуда змінних у часі інерційних навантажень. Здавалося б, навіть при найнебезпечніших режимах з погляду динаміки вітроустановки інерційні навантаження на лопаті залишаються мізерними порівняно з аеродинамічними, проте, поряд зі зростанням амплітуди, різко збільшується частота їх дії. У зв'язку з цим актуальними є дослідження власних коливань лопатей вітроколеса та порівняння параметрів цих коливань із характеристиками збурюючих навантажень. Саме тому в роботі [2] було здійснено спробу проаналізувати власні поперечні коливання лопатей, які розглядалися як призматичні стрижні, при їх жорсткому закріпленні до маточини вітроколеса, та доведено, що рух лопатей у даному випадку є динамічно стійким (частоти власних коливань лопатей значно відрізняються від частот їх обертання).

**Висновки.** Аналізуючи отримані результати, можемо зробити такі висновки: 1) найбільший вплив (близько 95% від еквівалентного інерційного навантаження) на лопаті чинить відцентрова сила, яка виникає при обертанні вітроколеса. Значно менший вплив (близько 5%) чинить коріолісова сила, яка виникає при одночасному обертанні гондоли і вітроколеса. Менше 1% від еквівалентного інерційного навантаження складають усі інші відцентрові, дотичні та коріолісові сили; 2) коріолісові сили становлять близько 10–15% від загального навантаження на лопать вітроустановки, тоді як аеродинамічні сили – близько 50–60%, гравітаційні – 15–25%, відцентрові, дотичні сили інерції та інші навантаження – 15–25%. Тому завдання теоретичного моделювання коріолісових сил інерції та врахування їх при побудові математичних моделей навантажень лопатей є досить актуальним; 3) при збільшенні кутової швидкості вітроколеса, гондоли чи лопаті різко зростають частоти й амплітуди коливань інерційних навантажень. При цьому ці частоти можуть збігатися з частотою власних коливань лопаті й при складному обертанні в системі можуть виникати резонансні режими; 4) більшість інерційних навантажень виникають лише при неусталених режимах роботи вітроустановки, тобто при різкій зміні напрямку чи швидкості повітряного потоку. Такі режими, зазвичай, короткотривалі, проте з метою забезпечення максимальної надійності роботи вітроустановки їх необхідно враховувати при проектуванні вітроколес.

У подальших етапах дослідження планується проаналізувати власні коливання лінійчастих профільованих лопатей тихохідного вітроколеса, експериментальний зразок якого виготовлено на кафедрі механіки та автоматизації машинобудування НУ «Львівська політехніка», а також дослідити можливість виникнення резонансних явищ унаслідок дії інерційних навантажень при пружному закріпленні лопатей та різних коефіцієнтах жорсткості.

**Conclusions.** The following conclusions can be made by analyzing of the obtained results: 1) the greatest influence (about 95% from equivalent inertial loading) on the blades is

caused by the inertial loading, which arises at wind-wheel rotation. Considerably smaller influence (about 5%) is made by the Coriolis force, which arises at simultaneous rotation of nacelle and wind-wheel. Less than 1% of the equivalent inertial loading are those centrifugal, tangential and the Coriolis forces; 2) the Coriolis forces make about 10–15% of the total loading on the blade of wind turbine, aerodynamic forces – about 50–60%, gravitational – 15–25%, centrifugal, tangential forces of inertia and other loadings – 15–25%. That's why the task of theoretical modeling of the Coriolis inertial forces and taking them into consideration when building the mathematical models of blade loadings is rather actual; 3) oscillations frequencies and amplitudes of inertial loadings abruptly increase when rising of angular velocity of wind-wheel, nacelle or blade. Herewith, these frequencies may coincide with the frequency of blade free vibrations and the resonant modes may rise during compound motion of the system; 4) most of inertial loadings rise only under unsettled modes of wind turbine functioning, i.e. sharp changing of wind flow direction or speed. These modes are usually short-term, but they should be taken into consideration when designing of wind-wheels for the purpose of support of maximal operation reliability of the wind turbine.

Free vibrations of linear profiled blades of low-speed wind-wheel in further stages of investigation are to be analysed. Its experimental model was made at the chair of mechanics and automatization of machine building at the Lviv National Polytechnic University. Besides, the possibilities of resonant effects arising as the result of inertial loadings influence at elastic blade attaching and different stiffness coefficients will be investigated in the future.

#### Список використаної літератури

1. Кузьо, І.В. Аналіз аеродинамічних та інерційних навантажень тихохідного вітроколеса [Текст] / І.В. Кузьо, В.М. Корендій, Н.І. Прокопеч // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 701. – С. 43–50.
2. Корендій, В.М. Оцінювання характеристик міцності та жорсткості лопатей тихохідного вітроколеса [Текст] / В.М. Корендій // Український міжвідомчий науково-технічний збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні». – 2011. – № 45. – С. 68–75.
3. Кузьо, І.В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса [Текст] / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Наукові нотатки. – 2011. – № 32. – С. 115–123.
4. Кузьо, І.В. Аналіз гравітаційних та інерційних навантажень при нерівномірному складному русі лопатей вітроколеса [Текст] / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Праці Одеського політехнічного університету. – 2011. – № 2. – С. 52–57.
5. Кузьо, І.В. Комп'ютерне моделювання навантажень лопатей тихохідного вітроколеса [Текст] / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 713. – С. 94–98.

*Отримано 08.02.2012*